黑龙江省热量资源变化及其对作物生产的影响

杜春英(1);宫丽娟(1);张志国(1);赵慧颖(1);吴双(1);田宝星(1);赵放(1,2)

(1)中国气象局.东北地区生态气象创新开放实验室　哈尔滨　150030; (2) 宁夏大学农学院　银川　750021

摘　要: 气候变暖背景下,热量资源变化势必对寒地农作物生长发育、生产环境及种植制度产生重要影响。本文利用黑龙江省 1971—2014 年 67 个观测站逐日气象资料，计算了≥10 ℃和≥0 ℃的活动积温及无霜期等农业热量指标。采用线性倾向率、累计距平、M-K 检验和经验正交函数(EOF)方法等统计方法，分析了热量资源变化特征及突变特征，以及对农业生产的可能影响。结果表明：≥10 ℃和≥0 ℃活动积温分别以 86.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$ 和 80.5 ℃·d·(10a)$^{-1}$ 的速率显著增加，无霜期呈延长趋势(气候倾向率为 3.8 d·(10a)$^{-1}$；≥10 ℃积温和无霜期在 1990 年代发生突变，突变后二者初日提前，终日延后；≥10 ℃和≥0 ℃积温的增加幅度西部大于东部，无霜期延长幅度中西部大于东北部，农业热量资源变化幅度大的地区亦是热量敏感区域。热量资源增加对农业影响，表现在农作物适宜生育期延长；适宜水稻和玉米种植的区域向北、向西扩张，大豆种植重心北移；原适宜种植极早熟、早熟品种的区域逐步被中熟、中晚熟品种替换；热量增加为水稻、玉米和大豆三大作物产量的提高提供了潜在的可能

关键词: 积温；热量资源；空间变化；作物种植带；三大作物

中图分类号: P467　　**文献标识码: A**

Variation characteristics of heat resource and its effect on crop production in Heilongjiang Province

DU Chunying[1], GONG Lijuan[1**], ZHANG Zhiguo[1], ZHAO Huiying1, WU Shuang[1], TIAN Baoxing[1], Zhao Fang[1,2]

(1. Open laboratory of China Meteorological Administration for Ecological and Meteorological Innovation in Northeast China, Harbin 150030, China; 2. School of Agriculture Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Under the global warming background, variation of heat resource has significant impact on crop production, environment and cultivation zone in clod region. This study used daily meteorological data form 67 meteorological stations in Heilongjiang Province from 1971 to 2014. The heat indices of heat resource including accumulated temperature above 10 ℃, 0 ℃ and annual frost-free duration were calculated. Their variation trends and mutation were analyzed by using linear regression, accumulated anomaly method, M-K trends test and empirical orthogonal function (EOF) analysis. The effect of heat resource on growing seasons analyzed. The results showed that the accumulated temperature above 10 ℃ and 0 ℃ increased significantly at a rate of about 86.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$and 80.5 ℃·d·(10a)$^{-1}$respectively.The annual frost-free duration increased at a rate of about 3.8 d·(10a)$^{-1}$. The accumulated temperature above 10 ℃and the annual frost-free duration showed clear mutation in nineteen nineties. The beginning day of the accumulated temperature above 10 ℃, 0 ℃ and frost-free duration were advanced and the terminal day of them were delayed. The intervals between the beginning days and the terminal days extended. The increasing rate of accumulated temperatures above 10 ℃ and 0 ℃ were greater in the west than that in the east. The annual frost-free duration was longer in Midwest than that in northeast. The area with great change of l heat resource was also sensitive area. The impact of increasing heat resource on crop production showed up that development stage of crops extended. The change of planting pattern presented that planting area of rice, maize and soybean enlarged. Suitable planting area of rice and maize extended into north and west. Soybean planting range moved northward gradually. For crop varieties, the original especial-early-maturity and early-maturity has been replaced by Middle-maturity and middle-late-maturity. The increasing heat resources could provide possibility of increased the yield of the three major grain crops. In the past 44 years.

Keywords: Accumulated temperature; Heat resource; Spatial variation; Crop cultivation zone; Three major cereal crops

IPCC 第 5 次评估报告[1]指出，过去百年间(1880—2012 年)，全球平均温度已升高 0.85 ℃(0.65~1.06 ℃); 1983—2012 年间，地表温度的倾向率比 1850 年以来的任何时期都高，与过去 1400 年相比，这可能是北半球气温最高的 30 年。研究表明，中国的气候变暖与全球变暖同步，但平均增温速率明显高于同期的全球或北半球[2-4]，进入 20 世纪 90 年代后东北地区增温尤其显著，中国东北地区是全国气温升高幅度最明显的地区之一[5-7]。气候变化将改变农业热量资源，这将对作物生产产生重要的影响，尤其是改变农作物品种结构、生长发育及产量和种植制度等[8-11]。IPCC 报告认为，气候变暖可能有利于作物增产，尤其是中高纬度地区。在气候比较凉爽的东北地区，水稻(*Oryza sativa*)和玉米(*Zea mays*)产量表现为增加的趋势[12-13]；一定程度的

增温利于大豆(*Glycine max*)增产[14]，李秀芬等研究表明,气候变暖使位于我国最北端的黑龙江省玉米单产增加，热量资源的增加对其单产贡献率达到 10%以上[15]。对中国过去 50 年种植制度的研究表明，热量资源的变化使农作物的种植界限发生变化，双季稻种植北界北移[16]，冬小麦潜在光温适宜区界限北移西扩[17]；东北地区春玉米种植北界向北向西移动[18]。因此，研究气候变暖背景下热量资源对作物生长发育、产量形成以及种植制度的影响具有重要意义。黑龙江省位于中国最北端，在气候变化的背景下，变暖趋势更为显著[19]。近年来针对黑龙江省气候资源有较多研究，但主要针对全省范围气候资源或气候资源对单一作物生产影响[13-15]，而对气候资源尤其是热量资源变化及其对黑龙江省三大作物(水稻、玉米、大豆)影响的研究较少。本研究利用黑龙江省 67 个气象站 1971—2014 年的气象观测资料和对应的产量资料，对决定黑龙江省作物种植的主要热量指标(积温和无霜期)的时空变化及其突变特征进行分析，并以突变点为分界点，比较突变前后热量资源的变化，以及热量资源变化可能导致的三大作物种植带和生长发育期、产量等的变化，旨为黑龙江省进一步合理调整农作物种植结构提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料来源

本文所用气象资料来源于黑龙江省气象局整编资料, 1971—2014 年 83 个基本气象站的资料，剔除资料不完整的台站，实际使用 67 个台站的气温资料。由于黑龙江省部分站点是在 70 年代以后建立，在计算积温时，使用 1971—2014 年的资料, 70 年代后对个别存在缺测的样本进行了线性内插。三大作物(水稻、玉米、大豆)发育期资料包括逐年发育期日期，生育期日数等来自农业气象观测站(水稻 15 个，玉米 30 个，大豆 28 个)，各县(市)粮食产量资料来自黑龙江省统计局，包括各作物单产、总产和种植面积资料。

1.2　试验方法

采用 5 日滑动平均法[20]判定日平均气温稳定通过 10 ℃和 0 ℃日期，初日和终日间的温度累积为≥10 ℃和≥0 ℃积温(℃·d)。从一年中稳定通过 10 ℃(或 0 ℃)的温度序列最长一段中，选取第一个日期序列作为初日，选取最后一个日期序列作为终日。春季地面最低温度最后一次≤0 ℃的次日到秋季第一次地面最低温度≤0 ℃的前一日之间的天数即为无霜期。

1.3　变化趋势和突变分析

引入倾向率，对≥10 ℃、≥0 ℃积温和无霜期等进行分析。利用最小二乘法拟合一元线性方程，分析气候数据的变化趋势，表达式如下:

$$X = at + b \qquad t=1, 2, 3, \dots, n \tag{1}$$

式中：a、b为回归系数，把$a\times10$称作该气象要素的倾向率，其单位为℃·d $(10a)^{-1}$ 或 d $(10a)^{-1}$[20]，X 为气象要素，t 表示时间(年)。

采用累积距平曲线法、Kendall 法(简称 M-K 法)进行热量的突变分析，采用 EOF(经验正交函数分解)[21]分析热量资源的空间敏感性。对线性变化趋势的显著性进行检验，若通过 $\alpha\leqslant0.05$ 水平检验时为显著，$\alpha\leqslant0.01$ 水平检验时为极显著，否则为不显著。M-K 突变检验中，在正序列曲线超过临界值信度线(α=0. 05 显著性水平临界值)的前提下，若正序列和反序列 2 个统计序列仅有一个交叉点，且位于信度线之间，则表明该交叉点为突变点，且统计上显著。

作物实际单产主要由趋势产量、气象产量和随机误差 3 部分组成，即$Y = Y_t + Y_w + e$，其中Y为实际单产(kg hm^{-2})；Y_t为趋势产量(kg hm^{-2})，主要由为高产品种推广使用、农业耕作技术进步、化肥农药投入等的影响；Y_w是气象产量(kg hm^{-2})，是受气候变化影响的波动产量分量；e是一些随机因素影响的产量分量，可以忽略[21]。采用滑动平均法得到趋势产量，从实际单产中扣除趋势产量，即为气象产量。

1.4　主要作物热量指标

根据相关文献[22-24]，并结合黑龙江实际，将分析所用指标归纳整理如下：以≥10 ℃指标分析对作物种植带的影响(表 1)。

根据突变点将各指标分别划分为前后两个时段，根据前后时段的变化分析农业资源变化的影响。农业上确定三大作物(水稻、玉米、大豆)能否种植至少保证 80%以上年份有比较可靠收成，本文所用指标也采用 80%保证率下的值。

表 1　黑龙江省三大作物不同熟型≥10 ℃积温指标(℃·d)

Table 1　The accumulated temperature above 10 ℃ for different maturating-type varieties of the three major crops in Heilongjiang province

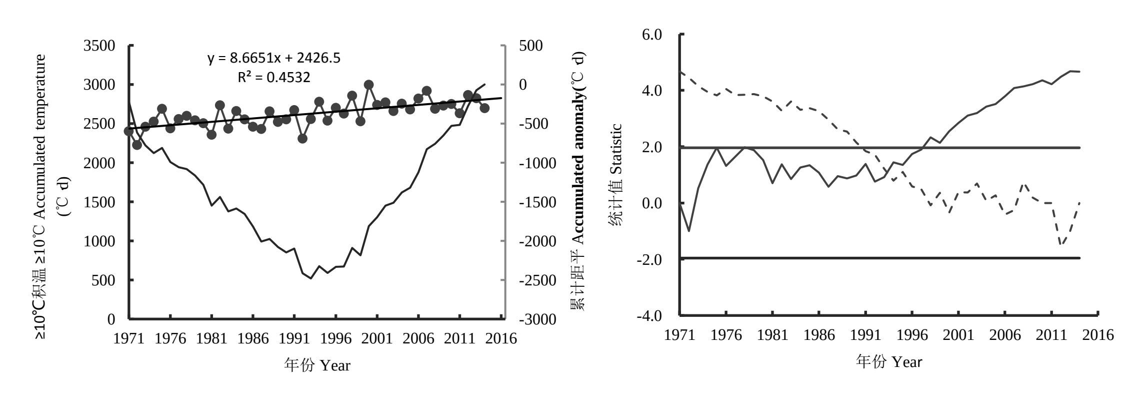
作物 Crops	品种熟型 Maturating-type	≥10(℃·d) ≥10 ℃ accumulated temperature (℃·d)
水稻 Rice	极早熟 Especial-early-maturating	＜2 200
	早熟 Early-maturating	2 200～2 400
	中熟 Midseason-maturating	2 400～2 700
	中晚熟 Middle-late-maturating	2 700～2 800
	晚熟 Late-maturating	≥2 800
玉米 Maize	早熟 Early-maturating	2 100～2 400
	中熟 Midseason-maturating	2 400～2 700
	晚熟 Late-maturating	≥2 700
大豆 Soybean	早熟 Early-maturating	1 985～2 130
	中熟 Midseason-maturating	2 130～2 330
	晚熟 Late-maturating	2 330～2 455
	极晚熟 Especial-late maturating	≥2 455

2　结果与分析

2.1　黑龙江省农业热量资源的时间变化

从黑龙江省农业热量资源的时间变化趋势来看(图 1)，≥10 ℃，≥0 ℃积温和无霜期的倾向率分别位 86.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$，80.5 ℃·d·(10a)$^{-1}$ 和 3.8 d·(10a)$^{-1}$, 3 个农业热量指标的倾向率均为正值，即 3 个农业热量指标均表示为增加(延长)趋势，且 3 个热量指标的增加趋势均通过了 α=0.001 的显著性检验。

≥10 ℃、≥0 ℃积温和无霜期的累积距平曲线在 1971—1990 年间呈现明显下降趋势，之后则为上升趋势，即 3 个指标的累积距平曲线均为先下降后上升，拐点出现在 1993 年附近。利用 M-K 方法进一步确认突变点，图中直线为 α=0.05 显著性水平临界值。在信度范围，≥10 ℃积温的两统计量相交于 1993 年，说明在≥10 ℃积温在 1993 年发生了突变，具体表现为积温的迅速增加。≥0 ℃积温的两统计量相交于 1992 年，但是交点超出信度范围，没有通过 α=0.05 的显著性检验。无霜期的两统计曲线在 1991—1993 年相交，即在无霜期在 1991—1993 年间发生突变。综合累积距平曲线和 M-K 检验，≥10 ℃积温和无霜期的突变点均在 1993 年，突变后的≥10 ℃积温平均比突变前提高了 226.1 ℃·d，无霜期平均延长了 9.2 d。≥0 ℃积温在 1993 年附近积温出现了增加趋势，但是突变点不明显，为了与其他 2 个热量指标统一，仍将 1993 年作为划分其变化的时间点，1994—2014 年≥0 ℃积温比 1971—1993 年间平均增加了 198.3 ℃·d。



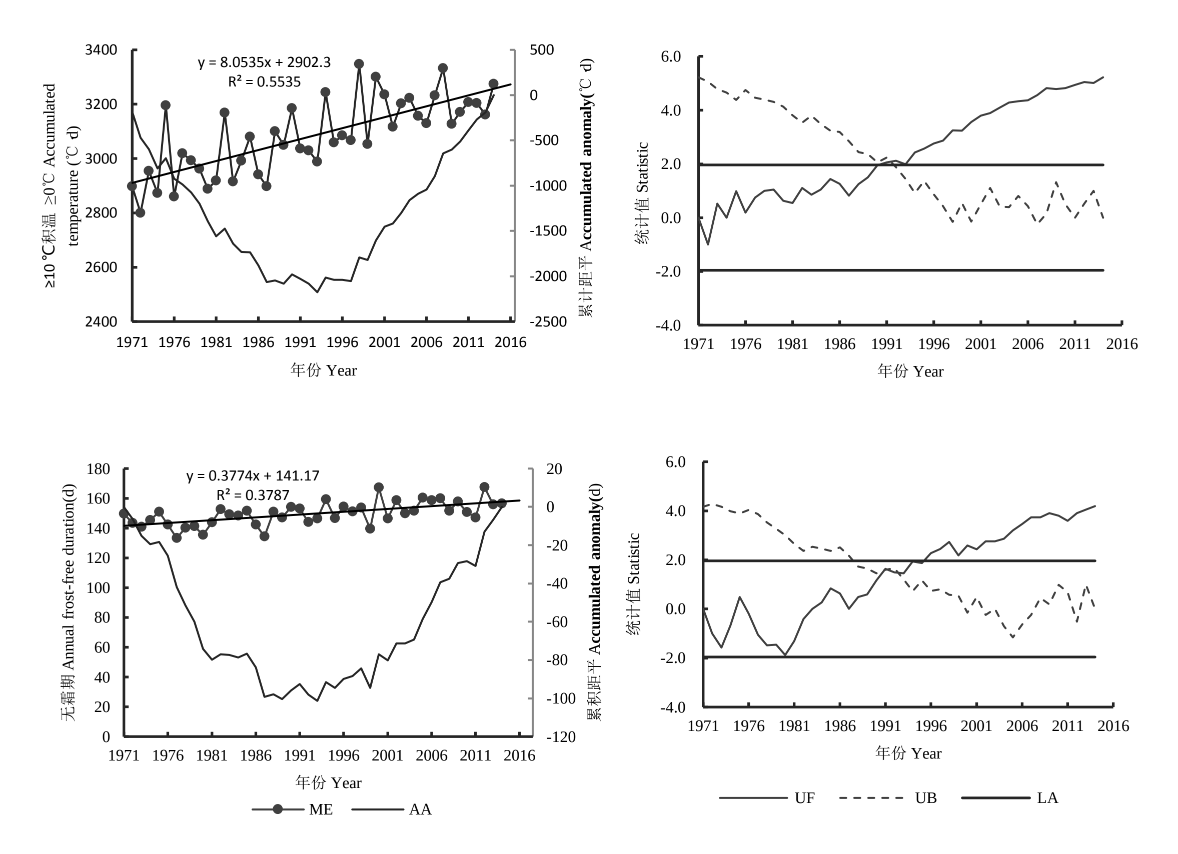


图 1　黑龙江省 1971—2014 年农业热量资源的时间变化(左)及 M-K 检验(右)

Fig. 1　Temporal changes of agricultural heat resources and the Mann-Kendall curves in Heilongjiang province from 1971 to 2014

ME: 气象要素, AA: 累积距平, 方程为气象要素变化趋势(左图); UF: 正序列, UB: 反序列, LA: 临界值(右图)。ME: meteorological elements. AA: accumulated anomaly. Equations in the left figures denote the variation trends in meteorological elements; UF: normal sequence. UB: inverse sequence. LA: critical value (right figure).

表 2 是黑龙江省不同界限温度的初日、终日日序及无霜期的变化趋势,表中日数代表稳定通过 10 ℃或 0 ℃的持续天数。从表中可以看出，≥10 ℃初日和稳定通过 10 ℃日数变化明显，倾向率分别为-2.1 d·(10a)$^{-1}$ 和 3.1 d·(10a)$^{-1}$，且分别通过了 α=0.01 的显著性检验。≥0 ℃终日和稳定通过 0 ℃日数变化明显，且通过了 α=0.01 的显著性检验，其气候倾向率分别为 2.4 d·(10a)$^{-1}$ 和 3.6 d (10a)$^{-1}$。2011—2014 年平均比 1971—1980 年初日平均提前 6.1 d，终日延后 3.1 d，持续日数增加 9.2 d。无霜期初日显著提前, 21 世纪以来平均比二十世纪七十年代提前了 13.0 d，无霜期延长，平均每 10 年延长 3.8 d。≥10 ℃、≥0 ℃和无霜期初日变化趋势均为负(提前)，终日为正(延后)，平均气温稳定通过 10 ℃或 0 ℃日数与无霜期变化趋势均为正，在变化趋势上，≥10 ℃初日提前的天数比终日延后的天数多。

表 2　黑龙江省 1971—2014 年≥10 ℃、≥0 ℃初终日、持续日数和无霜期的倾向率(d·(10a)$^{-1}$)

Table 2　The tendency rate of the first day, the last day and duration of the above 10 ℃, 0 ℃ and frost free duration in Heilongjiang province from 1971 to 2014

	≥10 ℃	≥0 ℃	无霜期 Frost-free duration
初日 The first day	–2.1**	–1.3	–3.0**
终日 The last day	1.0	2.4**	0.8
日数 The duration	3.1**	3.6**	3.8**

*通过了 α=0.05 水平的显著性检验, **通过了 α=0.01 水平的显著性检验，下同。* indicate significant at α=0.05 levels. ** indicate significant at α=0.01 levels.

2.2　黑龙江省农业热量资源的空间变化

黑龙江省农业热量资源具有区域性特征(图 2)，具体来看，≥10 ℃积温的倾向率为–10.7~145.1 ℃·d·(10a)$^{-1}$，研究期间，除大兴安岭西部外，全省大部≥10 ℃积温倾向率为正，表明积温呈增加趋势。低值区(＜90 ℃·d·(10a)$^{-1}$)主要分布在黑龙江省的中东部；高值区(≥90 ℃·d·(10a)$^{-1}$)集中在黑河、松嫩平原、三江平原东北部和牡丹江中部。除漠河外，其他站点均通过了 α=0.01 及以上的显著性检验。≥0 ℃积温的气候倾向率在 14.1~127.0 ℃·d·(10a)$^{-1}$，黑河、松嫩平原部分区域及牡丹江中部穆棱的倾向率≥90 ℃·d·(10a)$^{-1}$，其他大部区域的倾向率在 90 ℃·d·(10a)$^{-1}$ 以下，与≥10 ℃积温倾向率分布相同，且大部站点通过了 α≤0.01 的显著性检验。除漠河外，全省大部区域的无霜期均有一致延长的趋势，而且中西大部区域的延长趋势在 3 d·(10a)$^{-1}$ 以上，以黑河中部、松嫩平原部分县市、五营和牡丹江东部延长最明显，局部可达 6 d·(10a)$^{-1}$ 以上, 80.6%的站点通过了 α=0.05 及以上的显著性检验。

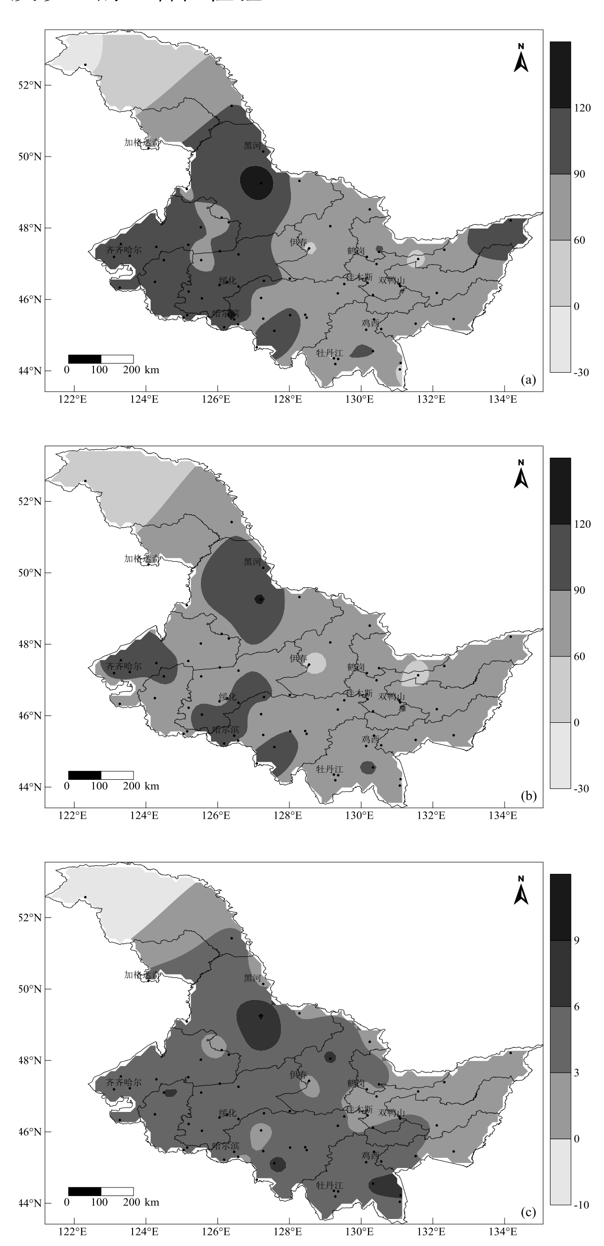


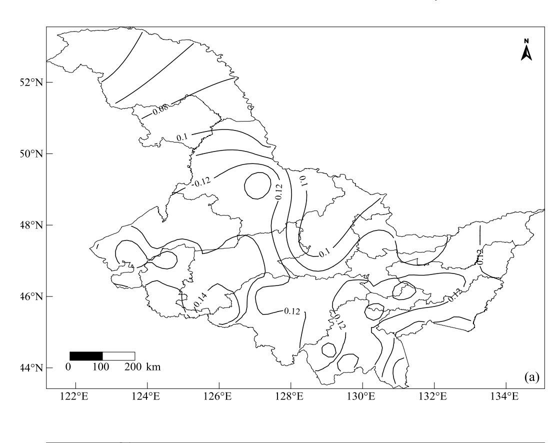
图 2　黑龙江省 1971—2014 年农业热量指标倾向率的空间分布(a, b 为≥10 ℃和≥0 ℃积倾向率，℃·d·(10a)$^{-1}$; c 为无霜期的倾向率，d·(10a)$^{-1}$)

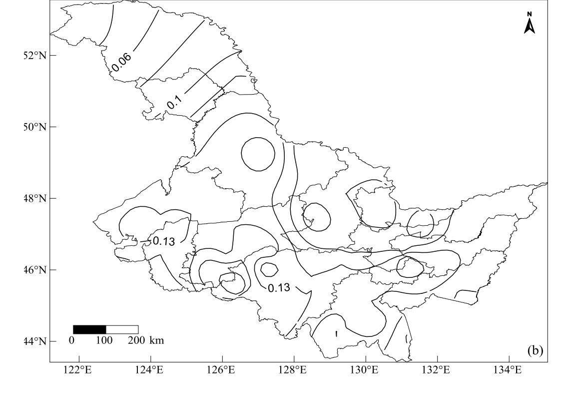
Fig.2　Spatial distribution of　tendency rate of agricultural heat indices in Heilongjiang province(a, b are tendency rate of the accumulated temperature above 10 ℃and 0 ℃，℃·d·(10a)$^{-1}$. c is tendency rate of frost-free duration, d·(10a)$^{-1}$)

2.3　黑龙江省农业热量资源的变率分布结构

对积温变量等进行EOF分解，通过显著性检验的前几个特征向量能够最大限度地表征黑龙江省该变量场的变率分布结构[21]。图3是黑龙江省≥10 ℃、≥0 ℃积温和无霜期第一特征向量场的空间分布。≥10 ℃和≥0 ℃积温的第一特征向量方差贡献率分别高达 76.3%和 88.3%，占绝对支配位置，变率分布结构明显(图 3a,3b)，主要表现在，黑龙江省积温为一致的增加或减少趋势，且二者空间结构相似，各地的变化情况有这样的现象：等值线在 0.12 以下的地区主要集中在以山地或丘陵为主的大兴安岭、黑河西部，伊春，三江平原中北部，牡丹江西南部；黑河中南部、西部松嫩平原、三江平原西南部载荷值在 0.12 以上，载荷大区分布在松嫩平原南部。说明这些地区积温变率大，亦是积温变化的敏感区；不同的是，≥10 ℃积温在三江平原东北部载荷在 0.12 以上。由于≥10 ℃和≥0 ℃积温第一特征向量对应的时间系数均为正值，所以二者的第一特征向量表示了该时段内积温增加的一致性。无霜期 EOF 展开后收敛速度没有积温快，仅第一个特征向量的方差贡献率超过 10.0%，达到 45.6%，所以无霜期第一特征向量场可以表征其主要变率分布结构，从图 3c 中可见，除大兴安岭西部外，全省大部区域无霜期为一致的减少或增加趋势，各地变率程度有所不同，黑河中南部、松嫩平原大部、牡丹江东部和鸡西西部等值线在-0.12 以下，其中孙吴、大庆北部、绥化中部、哈尔滨中部和牡丹江东部，载荷值在–0.14 以下；由于无霜期第一特征向量对应的时间系数均为负值，表示了除大兴安岭西部外，全省大部地区无霜期延长的一致性。

对比图 2，热量指标空间变率的高载荷区与其倾向率的高值区域部分重叠，中西部的≥10 ℃积温空间变率≥0.12 区域与其倾向率的高值区域，≥0 ℃积温和无霜期空间变率≥0.13 区域与其倾向率的高值区重叠，即在该区域热量指标增加趋势明显，且属于变化的敏感区域。





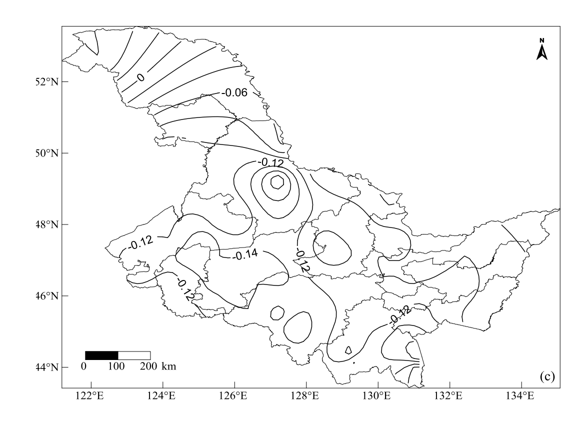


图 3 黑龙江省 1971—2014 年农业热量指标 EOF 展开的第一特征向量场(a.≥10 ℃; b.≥0 ℃; c. 无霜期)

Fig. 3 The characteristic vectors of EOF of agricultural heat indices in Heilongjiang province from 1971 to 2014 (a. the accumulated temperature above 10 ℃. b. the accumulated temperature above 0 ℃. c. frost-free duration)

3 黑龙江省热量资源变化的影响

热量资源变化对黑龙江省三大作物(水稻、玉米和大豆)的生长发育、种植面积、品种熟型和产量等均有比较明显的影响，而且不同作物不同区域对热量资源变化的响应特征也表现得很不相同。

3.1 对农作物生育期的影响

黑龙江省积温增加，无霜期延长，农作物播种期提前、收获期推后，作物适宜生育期延长。相较于积温突变前(1971—1993 年), 1994—2014 年全省水稻播种期平均提前 10.1 d，移栽期提前 6.3 d，全生育期延长了 13.4 d，除乳熟期和成熟期分别推后 2.7 d 和 3.2 d 外，其它各生育期提前；黑龙江省玉米出苗期有提前趋势(倾向率为 0.7 d·(10a)$^{-1}$)，乳熟期和成熟期有显著推后的趋势，全生育期显著延长 2.3 d·(10a)$^{-1}$；温度升高加快了大豆生育进程，表现为除结荚和鼓粒期外，其他生育期均提前，全生育期呈缩短趋势。对黑龙江省三大作物的生育期日数与≥10 ℃、≥0 ℃积温和无霜期进行了一元线性回归分析(表 3)，从表中可以看出，≥10 ℃积温每增加 100 ℃·d，水稻生育期日数增加 2.4 d，玉米增加 0.2 d，而大豆生育期日数缩短 0.7 d；≥0 ℃积温每增加 100 ℃·d，水稻生育期日数增加 4.2 d，玉米增加 0.9 d，大豆生育期缩短 0.3 d；无霜期每增加 10 d，水稻生育期日数增加 4.5 d，玉米增加 1.1 d，大豆缩短 0.1 d。可见，1 年内积温和无霜期对三大作物正常成熟具有重要的作用，在一定范围内，积温增加，无霜期延长，水稻和玉米成熟期延后，生育期日数增加，大豆成熟期提前，生育期日数缩短。

表 3 黑龙江省 1971—2014 年≥10 ℃、≥0 ℃积温和无霜期与作物生育期日数的回归系数

Table 3 The regression coefficients between the accumulated temperature above 10℃, 0℃ and annual frost-free duration and development stage of crops in Heilongjiang province

作物 Crops	≥10 ℃积温 ≥10 ℃ accumulated temperature (℃•d)	≥0 ℃积温 ≥10 ℃ accumulated temperature(℃·d)	无霜期 Annual frost-free duration (d)
水稻 Rice	0.024*	0.042**	0.448*
玉米 Maize	0.002	0.009	0.111
大豆 Soybean	–0.007	–0.003	–0.006

3.2 对品种熟性布局的影响

本文≥10 ℃积温指标作为判定作物不同熟性品种的积温标准，详见表 1，并分别绘制了突变前后三大作物种植北界分布图。从图 4 结果可以看出，突变前(1971—1993 年)黑龙江省大兴安岭、黑河、伊春、松嫩平原北部、三江平原北部及牡丹江北部等地适宜种植水稻极早熟至早熟品种；突变后(1994—2014 年)早熟品种种植北界线(2 200 ℃·d)则明显北移，最北到达黑河的西部，北移约 1.0°，大兴安岭、黑河、伊春大部、绥化北部和牡丹江局部地区成为该熟型主要种植区。水稻中熟和中晚熟品种在积温突变前适宜种植在松嫩平原南部、三江平原大部和牡丹江南部地区，突变后适宜种植区域显著增多，松嫩平原北部、三江平原和牡丹江大部地区连成一片，都达到了“中熟+中晚熟”的搭配标准，松嫩平原向北扩伸了 0.9°，三江平原向东

延伸了 1.0°。积温 2 800(℃·d)是晚熟品种的种植积温需求，由于该品种对积温要求较高, 1971—1993 年在黑龙江省境内几乎不能种植该品种; 1994—2014 年在松嫩平原南部、三江平原中部及牡丹江南部有零星积温条件较好的地区可以种植。

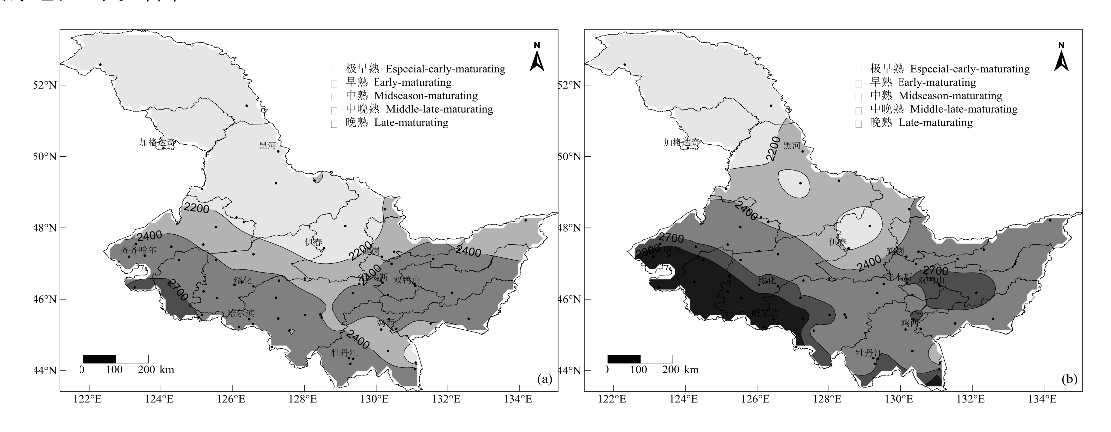


图 4　黑龙江省水稻种植带分布(a:1971—1993 年, b: 1994—2014 年)

Fig. 4　Distribution of crop cultivation zone of rice in Heilongjiang province during 1971—1993 (a) and 1994—2014 (b)

图 5 是玉米不同熟性种植北界的变化，从图中可见，突变后各熟性种植北界北移。突变前早熟品种主要集中在松嫩平原北部、三江平原北部、牡丹江北部等区域，突变后种植北界由德都-伊春-逊克北扩至大兴安岭南部，该熟型的适宜种植区域北抬，分布在黑河、伊春大部和绥化北部；中熟品种的适宜种植区由突变前的松嫩平原南部、三江平原大部和牡丹江南部北移至松嫩平原北部、三江平原大部、牡丹江大部，西部松嫩平原种植北界向北抬约 0.9°，东部三江平原向西扩 0.8°；晚熟品种由松嫩平原西南部局地北抬至松嫩平原南部、三江平原中部和牡丹江南部，种植区明显扩大，西部种植北界北抬 0.5°。

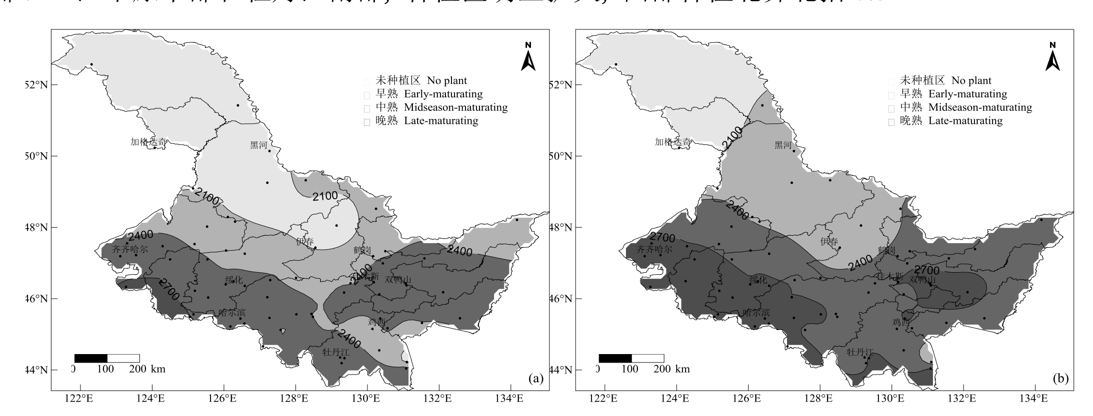


图 5　黑龙江省玉米种植带分布(a:1971—1993, b:1994—2014)

Fig. 5　Distribution of crop cultivation zone of maize in Heilongjiang province during 1971—1993(a) and 1994—2014(b)

图 6 是黑龙江省大豆种植带分布，从图中可以看出，早熟品种由突变前的黑河、伊春大部和绥化东北部区域北抬缩小至大兴安岭东部；而原突变前集中适宜种植早熟品种的黑河、伊春和绥化地区被中熟品种取代，突变后中熟品种的种植北界北抬至大兴安岭-黑河沿线；突变前松嫩平原南部、三江平原、牡丹江地区以“晚熟+极晚熟”种植模式为主，突变后晚熟品种种植带北移缩小，松嫩平原、三江平原和牡丹江大部地区适宜种植极晚熟品种，且相比于突变前适宜种植面积大幅增加，西部松嫩平原极晚熟品种的种植北界北抬至 48.5°N 附近，三江平原的东扩至 129.4°E 附近。

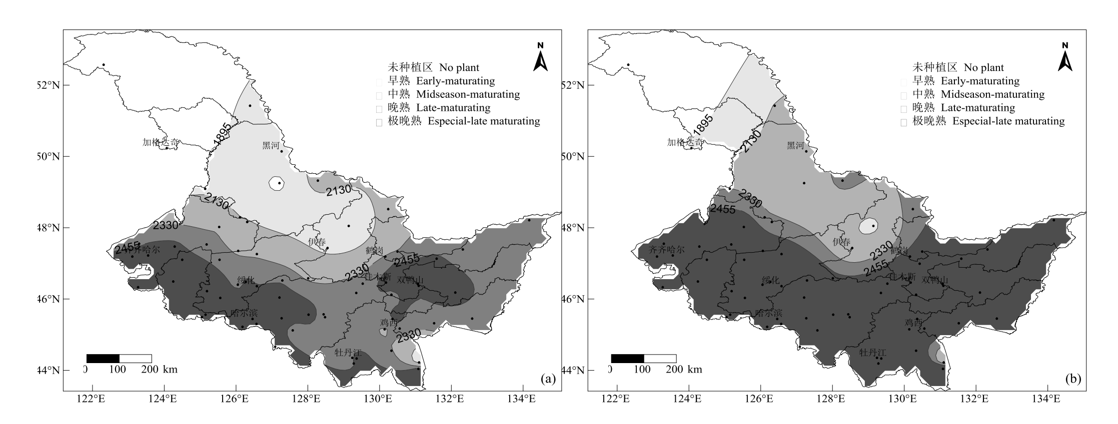


图 6　黑龙江省大豆种植带分布(a:1971—1993, b:1994—2014)

Fig. 6　Distribution of crop cultivation zone of soybean in Heilongjiang province during 1971—1993(a) and b:1994—2014(b)

3.3　对农作物产量的影响

农业热量增加会导致农作物产量和播种面积等方面的改变[12,25-26]。例如，黑龙江省水稻单产变化范围在 1 245.0~7 361 kg ·hm^{-2}，平均每年增加 113.2 kg ·hm^{-2}, 21 世纪初的这 14 年要明显高于 20 世纪 70 年代；近 44 年来玉米单产在 2 138.0~6 146.0 kg ·hm^{-2},1990 年代中后期产量有所下降，但 2004 年后又开始上升，平均每年增加 73.8 kg ·hm^{-2}；大豆单产在 901.8~2 308.8 kg ·hm^{-2}，波动中呈增加趋势，平均每年增加 21.2 kg ·hm^{-2}，整体增幅不如水稻和玉米。热量资源是影响三大作物单产的关键因素，不同作物对热量的要求不同。采用线性逐步回归方法分析研究区域农作物产量与本文中的三热量因子及其距平关系，发现黑龙江省农作物单产仅与≥0 ℃积温或≥0 ℃距平具有显著的相关关系。如表 4 所示，≥0 ℃积温每增加 100 ℃，水稻增产 62.0 kg ·hm^{-2}，平均每 hm^2 增产 5.3%；玉米增产 31.2 kg ·hm^{-2}，平均每 hm^2 增产 3.0%，大豆产量增加 14.2 kg ·hm^{-2}，平均每 hm^2 增产近 0.8%。受国家需求量增加、东北畜牧业发展、大量引入良种等关系外，气候变暖，积温带北移，农作物适宜种植区域北移东扩(如 3.2 节所示)，水稻、玉米播种面积在波动中呈持续增加趋势, 2014 年水稻种植面积是 1971 年的 25 倍；玉米播种面积增加了 256.1%；大豆播种重心北移，播种面积虽在 2009 年后有所减少，但整体呈增加趋势, 44 年间种植面积增加了 123.4%。近 44 年间黑龙江三大作物在单产增加和种植面积扩大的基础上，总产量大幅度提高。

表 4　积温对黑龙江省农作物增产的贡献

Table 4　Influence of change in accumulated temperature on major grain crops in Heilongjiang province

积温距平(100 ℃·d) The accumulated temperature anomaly	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean
Y_w (kg ·hm^{-2})	62.0	31.2	14.2
Y (kg ·hm^{-2})	1 167.4	1 032.6	1 870.4
$Y_w \cdot Y^{-1} \times 100$ (%)	5.3	3.0	0.8

4　讨论与结论

过去 40 年(1971—2014 年),气候变化背景下黑龙江省热量资源变化明显。≥10 ℃、≥0 ℃积温增加，无霜期延长, 1993 年是该区域热量变化的一个转折点，≥10 ℃积温突变后的平均值比突变前提高了 226.1℃·d, 无霜期延长 9.2 d。日平均气温稳定通过 10 ℃或 0 ℃初日提前，终日延后。空间变化上表现为除大兴安岭地区外的大部农区≥10 ℃、≥0 ℃积温和无霜期的倾向率均为正，即大部地区积温增加，无霜期延长，同时黑河、松嫩平原、三江平原和牡丹江等区域既是热量资源增加明显的区域又是热量变化敏感区域。热量资源增加，水稻和玉米可以提前满足积温需求，从而导致物候期提前，成熟期推后，生育期日数延长。大豆营养生长缩短，成熟期相应提前。热量资源的增加，使水稻和玉米两种喜温作物的种植面积扩大，全省除山区和部分丘陵外均有水稻、玉米的种植，对热量要求较高的晚熟品种种植北界向北，向西推移；大豆的种植范围重心逐渐北移。

在气候变化的背景下，黑龙江省气候变暖已成为不争的事实，但是气候变暖也可能引发极端性天气气候事件，干旱、洪涝、高温和低温冷害等农业气象灾害的发生频率增大[16]，农业生产面临的气象灾害风险将提高[27-29]，粮食生产的不确定性依然存在。尽管气候变暖在一定程度上对粮食产量的提高有促进作用，高纬度地区越往北其产量变化率变化越大，且增产效果越明显[12]。但是气候变暖缩短了玉米、水稻、大豆生长周期，且灌浆速率加快，光合作用时间减少，随着 CO_2 升高，作物光合速率和蒸腾速率上升，呼吸作用和气孔导度下降，产量有所提高，品质将会降低[30-31]，高纬度地区作物生物量的成熟度和品质更难保证。因此，气候变暖对粮食产量、品质的影响机制及生理过程还有待进一步深入分析。

气候变暖给农业生产结构调整带来了很大的可能，但是能否达到人们最大的期望，亦存在极大的不确定性。表面上看热量资源增加使得作物生长季延长，对三大作物产量形成、品种熟型更换产生了正面影响，理论上两大平原适宜“晚熟+极晚熟”的种植模式。同时，黑河、松嫩平原和三江平原可由气候突变前的以种植“早熟+中熟”品种替换为“晚熟+极晚熟”品种。但是热量资源的有效利用率也存在未知，对作物生长而言，气候变暖主要表现春季(作物播种期)与秋季(作物成熟期)热量增加，而夏季(作物生长关键期)热量增加不明显[5,7]，也就是说气候变暖热量增加的季节分配与作物各个生长期对热量的需求产生了错位。因此，在调整黑龙江省农作物布局时，不仅应充分考虑农业热量资源增加带来优势，而且兼顾水分和日照的重要作用以及光、温、水农业气候资源的配置，甚至仍需与经济效益、社会效益等诸多因素结合考虑[16]，才能确保粮食生产安全。

本文重点分析了气候变暖对寒地农业生产的可能影响，仅仅考虑了热量资源的限制，而没有考虑水分资源及其他气象因子的限制，同时未能考虑品种熟性及搭配、经济社会、政策等诸多因素的影响，结论也缺乏试验验证。虽然为黑龙江省农业结构调整和优化提供了前提和参考依据，但气候变暖带来的种植制度的可能变化能否成为现实，还需要更精细的数据和严谨的试验验证以及进一步的深入研究。

参考文献 References

[1] IPCC. Climate change: Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5) [R]. Switzerland: IPCC, 2013.

[2] 林学椿，于淑秋，唐国利.中国近百年温度序列[J].大气科学, 1995, 19(5): 525—534

Lin X C, Yu S Q, Tang G L. Series of average air temperature over China for the last 100-years period. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学), 1995, 19(5): 525—534

[3] 丁一汇，任国玉，石广玉，等.气候变化国家评估报告(Ⅰ)：中国气候变化的历史与未来趋势[J].气候变化研究进展，2006, **2**(1): 3—8

Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3—8

[4] 胡琦，潘学标，邵长秀，等. 1961—2010 年中国农业热量资源分布和特征变化[J].中国农业气象, 2014, 35(2): 119—127

Hu Q, Pan X B, Shao C X, et al. Distribution and variation of China agricultural heat resources in 1961-2010. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 119—127

[5] 贺伟，布仁仓，熊在平，等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报, 2013, 33(2): 519—531

He W, Bu R C, Xiong Z P, et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0519—0531

[6] 沈志超，任国玉，李娇，等.中国东北地区冬季气温变化特征及其与大气环流异常的关系[J].气象与环境学报，2013, 29(1): 47—54

Shen Z C, Ren G Y, Li J, et al. Winter temperature variability and its relationship with atmospheric circulation anomalies in northeast China. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(1): 47—54

[7] 孙凤华，杨素英，陈鹏狮.东北地区近 44 年的气候暖干化趋势[J].生态学杂志, 2005, 24(7): 751—755

Sun F H, Yang S Y, Chen P S. Climate warming-drying trend northeastern China during the last 44 years and its effects. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 751—755

[8] 李硕，沈彦俊.气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 227—235

LI Shuo, SHEN Yan-Jun. Impact of climate warming on temperature and heat resource in arid Northwest China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2):227-235

[9] 徐超，杨晓光，李勇，等.气候变化背景下中国农业气候资源变化III.西北干旱区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 763—772

Xu C, Yang X G, Li Y, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change III. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in northwest arid area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 763—772

[10] 肖登攀，陶福禄，沈彦俊，等.华北平原冬小麦对过去 30 年气候变化响应的敏感性研究[J].中国生态农业学报, 2014, 22(4): 430—438

XIAO Dengpan, TAO Fulu, SHEN Yanjun, LIU Jianfeng, WANG Rende. Sensitivity of response of winter wheat to climate change in the North China Plain in the last three decades. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4):430—438

[11] 周松秀，陈林林，刘兰芳，等.全球变化背景下南方丘陵区农业生态系统适应性时空演变特征研究——以衡阳盆地为例[J].中国生态农业学报, 2017, 25(2): 147—56

ZHOU S X, Chen L L, Liu L F, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of agro-ecosystem adaptability response to global change in South China hilly regions: A case study of Hengyang Basin[J]. Chinses Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 147—156

[12] 陈群，耿婷，侯嘉雯，等.近 20 年东北气候变暖对春玉米生长发育及产量的影响[J].中国农业科学，2014，47(10): 1904—1916

Chen Q, Geng T, Hou W J, et al. Impacts of climate warming on growth and yield of spring maize in recent 20 years in northeast China. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47, (10):1904—1916

[13] 王萍，李廷全，闫平，等.黑龙江省近 35 年气候变化对粳稻发育期及其产量的影响[J].中国农业气象, 2008, 29(3): 268-271

Wang P, Li T-Q, Yan P, et al. impacts of climate change over last 35years on rice growing period and yield in Heilongjiang provice. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(3): 268—271

[14] 姜丽霞，李帅，李秀芬，等.黑龙江省近三十年气候变化对大豆发育和产量的影响[J].大豆科学, 2011, 30(6): 921—926

Jiang L X, Li S, Li X F, et al. Impacts of climate change on development and yield of soybean over past 30 years in Heilongjiang province. Soybean Science, 30(6): 921—926

[15] 李秀芬，陈莉，姜丽霞.近 50 年气候变暖对黑龙江省玉米增产贡献的研究[J].气候变化研究进展, 2011, 7(5): 336—341

Li X F, Chen L, Jiang L X. Contribution of climate warming to maize yield for 1961-2008 in Heilongjiang province [J]. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(5):336—341

[16] 杨晓光，刘志娟，陈阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅰ.气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J].中国农业科学, 2010, 43(2): 329—336

Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warning on northern limits of cropping systems and crop yield in China. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(2): 329—336

[17] 孙爽，杨晓光，赵锦，等.全球气候变暖对中国种植制度的可能影响Ⅺ.气候变化背景下中国冬小麦潜在光温适宜种植区变化特征[J].中国农业科学, 2015, 48(10): 1926—1941

Sun S, Yang X G, Zhao J, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅺ. The variation of potential light-temperature suitable cultivation zone of winter wheat in China under climate change[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2015, 48(10): 1926—1941

[18] 赵锦，杨晓光，刘志娟，吕硕，王静，陈阜.全球气候变暖对中国种植制度的可能影响Ⅹ.气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响[J].中国农业科学, 2014, 47(16): 3143—3156

Zhao J, Yang X G, Liu Z J, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅹ. The possible impacts of climate change on climatic suitability of spring maize in the three province of Northeast China [J]. Scientia Agriculture Sinica, 2014, 47(16): 3143—3156

[19] 刘实，王勇，缪启龙，等.近 50 年东北地区热量资源变化特征[J].应用气象学报, 2010, 21(3): 266—278

Liu S, Wang Y, Miu Q L, et al. Variation characteristics of thermal resources in northeast China in recent 50 years. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(3): 266—278

[20] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京：气象出版社， 1999

Wei F Y. Statistics diagnosis and prediction technology of modern climate. Beijing: China Meteorological Press, 1999

[21] 王馥棠.农业气象概论[M].农业出版社 , 1991

Wang F T. The introduction of agrometeorological forecast. China Agricultural Press, 1991

[22] 南瑞，高永刚，韩俊杰，等. 黑龙江省水稻主栽品种热量指标鉴定及适宜种植区划[J].中国农业气象，2007，28(4): 436—439

Nan R, Gao Y G, Han J J, et al. Identification of thermal indexes and region division of the main cultivated rice varieties in Heilongjiang province. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4): 436—439

[23] 杨镇.东北玉米[M].北京：中国农业出版社， 2007

Yang Z. The Maize in Northeast China. China Agricultural Press, 2007
[24] 陈立亭，孙玉亭.黑龙江省气候与农业[M].北京：气象出版社, 2000
Chen L T, Sun Y T. Climate and agriculture in Heilongjiang province. China Meteorological Press, 2000
[25] 方修琦，盛静芬.从黑龙江省水稻种植面积的时空变化看人类对气候变化影响的适应[J].自然资源学报， 2000，15(3): 213—217
Fang X Q, Sheng J F. Human adaptation to climate change: a case study of changes in paddy planting area in Heilongjiang province. Journal of Natural Resources, 2000, 15(3): 213—217
[26] 侯雯嘉，耿婷，陈群，等.近 20 年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J].应用生态学报, 2015, 26(1): 249—259
Hou J W, Geng T, Chen Q, et al. Impacts of climate warming on growth period and yield of rice in northeast China during recent two decades. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 249—259
[27] 王丽，霍治国，张蕾，等.气候变化对中国农作物病害发生的影响[J].生态学杂志, 2012, 31(7): 1673—1684
Wang L, Huo Z G, Zhang L, et al. Effects of climate change on the occurrence of crop disasters in China. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(7): 1673—1684
[28] 刘玉英，石大明，胡铁鑫，等.吉林农业气象干旱灾害的风险分析及区划[J].生态学杂志, 2013, 32(6): 1518—1524
Liu Y Y, Shi D M, Hu T X, et al. Risk analysis regionalization of agrometeorological drought hazard in Jilin province of northeast China. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1518—1524
[29] 宫丽娟，李帅，姜丽霞，等. 1961-2010 年黑龙江省水稻延迟型冷害时空变化特征[J].气象与环境学报, 2015, 31(1):76—83
Gong L J, Li S, Jiang L X, et al. Spatial-temporal characteristics of delayed cool injury for rice from 1961 to 2010 in Heilongjiang province. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(1): 76—83
[30] 吴海燕，孙甜田，范作伟，等. 东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应[J].农业资源与环境学报，2014,31(4):299—307
Wu H Y, Sun T T, Fan Z W, et al. The major food crops in response to climate change and its yield effect in northeast of China [J]. Journal of Agricultural Resources and environment, 2014,31(4): 299—307
[31] 房世波，沈斌，谭凯炎，等. 大气[CO 2]和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010,18(5):1116—1124
Fang S B, Shen B, Tan K Y, et al. Effect of elevated Co2 concentration and increased temperature on physiology and production of crops[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1116—1124